



## Relations de dépendance entre la configuration d'un accident VL-piéton et le déroulement du choc

François Coulongeat, Robert Anderson, Maxime Llari, Thierry Serre

### ► To cite this version:

François Coulongeat, Robert Anderson, Maxime Llari, Thierry Serre. Relations de dépendance entre la configuration d'un accident VL-piéton et le déroulement du choc. 4ème Colloque International Francophone du GERI COPIE, Nov 2013, Canada. 12p. hal-00960330

**HAL Id: hal-00960330**

**<https://hal.science/hal-00960330>**

Submitted on 18 Mar 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Relations de dépendance entre la configuration d'un accident VL-piéton et le déroulement du choc**

### **Relationships between the configuration of a pedestrian accident and its continuity**

François Coulongeat<sup>1</sup>, Robert Anderson<sup>2</sup>, Maxime Llari<sup>1</sup>, Thierry Serre<sup>1,3</sup>  
(4480 mots)

<sup>1</sup> : Laboratoire de Biomécanique Appliquée (LBA)

IFSTTAR, Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II

Faculté de médecine secteur Nord, Boulevard Pierre Dramard , 13916 Marseille Cedex 20 - France

<sup>2</sup> : University of Adelaide

CASR South Australia, 5005 Australia - Australie

<sup>3</sup> : Laboratoire Mécanismes d'accidents (IFSTTAR/LMA)

IFSTTAR

304 Chemin de la Croix Blanche, 13300 Salon-de-Provence - France

**Contact :** Thierry.serre@ifsttar.fr

#### **Résumé:**

Cette étude porte sur la compréhension des phénomènes mis en jeu lors d'un accident où un véhicule percute un piéton. L'objectif est de déterminer les relations de dépendance entre certains paramètres de configuration d'un accident tels que la vitesse du véhicule ou la position du piéton au moment de l'impact et le déroulement du choc (impact du piéton sur le véhicule, projection au sol).

Ce travail est basé sur la réalisation de nombreuses simulations numériques d'accident véhicule-piéton à l'aide d'un modèle multicorps et en suivant un plan d'expériences. Une étude paramétrique a ainsi été réalisée en faisant varier les facteurs d'entrée suivants: la vitesse et l'accélération du véhicule, l'orientation du piéton par rapport au véhicule, la position des jambes du piéton au moment de l'impact, le critère de rupture des tibias, le coefficient de frottement entre le piéton et le sol, la modélisation du contact entre le piéton et le véhicule.

L'influence de ces paramètres sur le déroulement du choc a ensuite été analysée au travers des paramètres de sortie suivants : la position, la vitesse et l'angle de l'impact de la tête sur le véhicule, les critères lésionnels au niveau de la tête et des jambes, le type de projection observé et les distances de projection au sol du piéton.

Un des caractères innovant de cette étude est la prise en compte des phénomènes d'interaction entre les différents facteurs. Les résultats montrent ainsi que la projection au sol du piéton est essentiellement déterminée par les valeurs de l'accélération du véhicule, la vitesse du véhicule, les choix de modélisation du contact entre le piéton et le véhicule, mais aussi par leurs interactions respectives. Le sens de projection du piéton dépend principalement de son orientation par rapport au véhicule au moment de l'impact et de la position de ses jambes.

D'une manière plus générale, les résultats de cette recherche permettent de mettre en avant de nombreux facteurs d'influence et introduit la notion d'interaction entre ces facteurs. Ces résultats peuvent, par exemple, servir de base lors de choix de modélisation ou être utilisés lors de la détermination de la configuration la plus probable d'un accident réel.

**Mots-Clés** : Choc piéton ; modélisation multicorps ; simulation numérique ; plan d'expérience

## 1. INTRODUCTION

La compréhension des phénomènes mis en jeu lors d'un accident entre un véhicule et un piéton est un enjeu majeur pour l'amélioration de la sécurité des usagers vulnérables. Les domaines d'applications sont multiples. Cela peut permettre d'améliorer la sécurité du piéton en modifiant la géométrie ou les matériaux du véhicule. La connaissance des relations entre le scénario et le déroulement d'un accident peut aussi permettre des reconstitutions d'accident (1-2-3). Ces reconstitutions peuvent avoir des retombées pour la recherche mais peuvent aussi servir de base pour des expertises juridiques.

De nombreuses études se sont penchées sur l'analyse du choc entre un véhicule léger et un piéton. Cinq trajectoires cinématiques de base ont ainsi été identifiées : projection enroulée, projection vers l'avant, projection sur le côté, projection sur le toit et saut périlleux (4). D'autres études se sont intéressées à l'influence de la vitesse du véhicule au moment de l'impact et de la forme du véhicule sur la gravité des lésions engendrées sur le piéton (5-6-7-8). Ainsi, la gravité des lésions augmente avec la vitesse que ce soit au niveau de la tête ou des membres inférieurs. L'angle d'impact de la tête diminue mais la vitesse d'impact de la tête augmente lorsque la vitesse du véhicule augmente (7). Le type de véhicule, quant à lui, va influencer de façon significative les résultats concernant l'impact de la tête et les lésions des membres inférieurs (7) et la géométrie du véhicule a une plus grande influence que la rigidité du véhicule sur les résultats d'une simulation (8). La forme du véhicule et la taille du piéton vont aussi influencer la position de l'impact de la tête et jouer un rôle significatif dans la gravité des lésions engendrées (5-9-10).

Différentes lois de contact entre le véhicule et le piéton ont également été comparées (11). D'autres études ont établi des modèles de prévision de la distance de projection du piéton en fonction de la vitesse du véhicule (12-13-14). En revanche, peu d'études s'intéressent à l'influence de l'accélération du véhicule sur la cinématique de l'accident ou sur les lésions observées au niveau du piéton (15-16) ou sur l'influence de l'orientation et du mouvement du piéton (17).

Cependant, chacune des études citées précédemment ne prend en compte qu'un voire deux facteurs indépendamment de tous les autres. L'objectif de notre étude est donc de trouver les paramètres qui ont le plus d'influence sur le déroulement d'un accident entre un véhicule et un piéton mais aussi d'étudier l'influence des interactions entre ces différents facteurs.

## 2. MATERIEL ET METHODES :

Pour déterminer les facteurs qui vont avoir la plus grande influence sur les résultats d'un accident, notre étude se base sur des simulations numériques d'accidents. Une étude paramétrique se basant sur l'influence de plusieurs facteurs a alors été réalisée. Les facteurs retenus sont la vitesse d'impact, l'accélération du véhicule, l'orientation du piéton, la position des jambes du piéton, la résistance en flexion du tibia, le coefficient de frottement entre le sol et le piéton et la modélisation du contact entre le véhicule et le piéton. Le paramètre accélération a été considéré afin d'évaluer si une voiture qui freine ou qui accélère au moment du choc influence l'impact du piéton sur le véhicule et sa projection au sol. L'influence de la géométrie du véhicule et de la taille du piéton ne sera pas étudiée étant donné le nombre important d'études ayant déjà été réalisées sur le sujet (5-6-7-8-9-10).

### 2.1 Description du modèle

Le modèle complet regroupant le véhicule et le piéton a été réalisé à l'aide d'un logiciel de mécanique multicorps MADYMO® (18). Si nos travaux sont basés sur l'utilisation de ce logiciel Madymo, les modèles ont été développés et validés conjointement par Chalmers University, la société Faurecia et le Laboratoire de Biomécanique Appliquée de l'IFSTTAR pour de multiples applications : analyses biomécaniques du choc, études de l'influence de la géométrie du véhicule, reconstructions d'accident, etc. (3-8-19)

Le modèle de véhicule qui a été retenu et réalisé à l'aide du logiciel Madymo est une berline moyenne basée sur les données fournies par (Mizuno, 2005). Le modèle de véhicule est composé de huit surfaces de contacts qui correspondent au pare-chocs bas, au pare-chocs, à la ligne de fuite du capot, au capot, au pare-brise, au toit et aux deux roues avant.

Le modèle de piéton retenu est le 50<sup>ième</sup> centile de l'homme adulte. Ce modèle est constitué de 37 corps rigides reliés entre eux par 37 liaisons cinématiques, de 82 surfaces de contact, d'un modèle de liaison de type "human-like" pour le genou (21) et d'un modèle de jambe fracturable (22). Le modèle de genou permet de prendre en

compte l'étirement des ligaments et le modèle de jambe permet de simuler une fracture lorsque la force d'impact dépasse un seuil de tolérance.

Les caractéristiques de contact entre le piéton et le véhicule sont définies dans le logiciel multicorps par des caractéristiques force/pénétration (11-18-21).

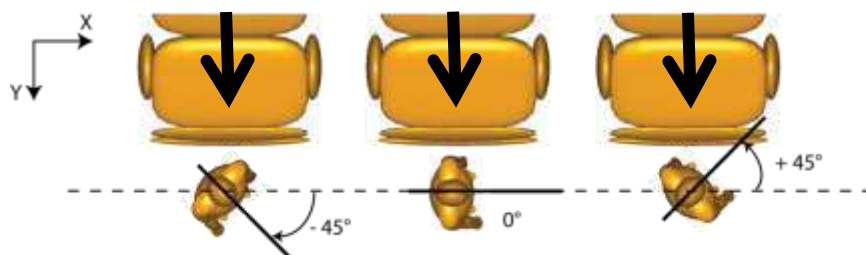
## 2.2 Description des facteurs

Cette étude consiste à simuler plusieurs configurations d'accident en faisant varier plusieurs facteurs. Le tableau 1 fournit l'ensemble de ces facteurs ainsi que les variations respectives de leurs valeurs. L'objectif de l'étude étant d'évaluer l'influence des différents paramètres, nous nous sommes focalisés sur des valeurs extrêmes plutôt que de tester de nombreuses valeurs intermédiaires qui multiplieraient le nombre de calcul et alourdiraient les exploitations. Maximum trois valeurs ont ainsi été choisies par paramètre.

Facteurs	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3
Vitesse du véhicule ( $\text{m.s}^{-1}$ )	5.5		14
Accélération du véhicule ( $\text{m.s}^{-2}$ )	-8	0	+5
Orientation du piéton ( $^{\circ}$ )	-45	0	+45
Résistance du tibia (N.m)	293		595
Coefficient de frottement entre le piéton et le sol	0.3		0.93
Posture de marche	Jambe impactée en avant	Jambes à la verticale	Jambe impactée en arrière
Modèle de contact	Avec amortissement		Sans amortissement

**Tab. 1 – Variation des facteurs étudiés**

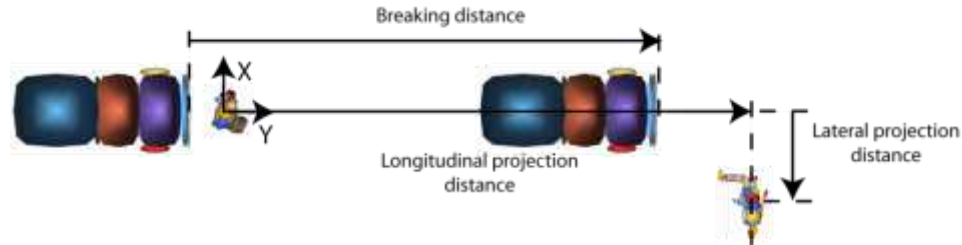
La vitesse du véhicule variera entre  $5,5 \text{ m.s}^{-1}$  et  $14 \text{ m.s}^{-1}$  car plus de 50 % des accidents piétons se situent dans cet intervalle (20). Les niveaux retenus pour l'accélération du véhicule sont de  $-8 \text{ m.s}^{-2}$ ,  $0 \text{ m.s}^{-2}$  et  $5 \text{ m.s}^{-2}$ , qui correspondent respectivement à des situations de freinage, d'absence de freinage d'urgence et d'accélération du véhicule. L'accélération du véhicule sera considérée comme constante tout au long d'une même simulation. Dans le cas d'un freinage, le changement d'assiette de freinage du véhicule sera pris en compte. Les orientations du piéton retenues correspondent respectivement à des angles de  $-45^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$  et  $45^{\circ}$  entre le plan frontal du piéton et la trajectoire du véhicule (cf. Fig. 1). Les jambes du piéton correspondront à une situation de marche, avec la jambe impactée en avant ou en arrière, ou en situation d'arrêt, où les jambes seront verticales. Les niveaux de résistance en flexion du tibia retenus correspondront au 95<sup>ème</sup> percentile homme et au 5<sup>ème</sup> percentile femme à partir d'essais de chargements dynamiques sur des tibias non dénudés (23) soit un moment de flexion maximal respectivement de 595 Nm et 293 Nm. Le coefficient de frottement entre le piéton et le sol prendra les valeurs de 0.3 et 0.93 qui correspondent aux bornes de l'intervalle de confiance à 99% des coefficients de frottement observés (24). Les propriétés de contact entre le piéton et le véhicule correspondent respectivement à des modèles développés par le Centre for Automotive Safety Research (11) prenant en compte l'amortissement non linéaire au cours de l'impact et des modèles développés par (21), correspondant à un contact purement élastique de rigidité importante. Ces modèles sont basés sur des essais sous-systèmes entre des impacteurs et les différentes parties du véhicule : jambe sur pare-chocs, capot et bord de capot. Pour tous les accidents, le piéton sera impacté au niveau du centre du véhicule.



**Fig. 1 – Orientation du piéton**

## 2.3 Variables étudiées

L'objectif principal de notre étude est d'étudier les principales relations de dépendance entre les facteurs cités précédemment et des paramètres caractéristiques d'un accident piéton. Le premier paramètre étudié sera le type de projection observé selon les configurations cinématiques les plus courantes (4). Dans le cadre de notre étude, on considèrera la trajectoire de type "saut périlleux" comme un cas particulier de la trajectoire enroulée. On étudiera les paramètres de projection longitudinale et latérale, calculés à partir de la position du bassin à la fin de la simulation (voir figure 2).



**Fig. 2 – Distance de projection du piéton**

Le Wrap Around Distance (WAD) et la position latérale de l'impact de tête sur le véhicule seront calculés à partir de la position de la tête au moment de l'impact entre la tête et le véhicule. Le WAD est la distance d'enroulement du piéton sur le véhicule qui correspond à la distance entre le sol et l'impact de tête le long d'une ligne suivant la forme du véhicule (25). Le critère lésionnel retenu est le Head Injury Criterion (HIC) (26). Le HIC sera calculé à partir de l'accélération de la tête avec un filtre CFC1000 selon la norme SAE J211/1 (27). Les lésions au niveau des membres inférieurs seront aussi analysées en calculant le maximum Abbreviated Injury Scale (MAIS) (28-29) à partir des fractures du tibia et du fémur observées ainsi que de l'élongation des ligaments du genou. Le Tab. 2 donne la correspondance entre les fractures observées et l'AIS.

Fracture	code AIS
Fémur	3
Tibia (une)	2
Tibia (multiples)	3

**Tab. 2 Corrélation entre les fractures du membre inférieur et le codage de leur sévérité (28).**

La vitesse d'impact de la tête correspond à la résultante de la vitesse relative de la tête par rapport au véhicule juste avant l'impact entre la tête et le véhicule. L'angle d'impact de la tête correspond à l'angle entre la direction de la tête par rapport au sol, juste avant l'impact entre la tête et le véhicule. Ces deux grandeurs correspondent aux configurations mises en place lors des essais sous-système entre, d'une part, la tête et le capot (25) et d'autre part entre la tête et le pare-brise.

## 2.4 Plan d'expérience

L'étude paramétrique réalisée consiste donc à faire varier simultanément l'ensemble des facteurs étudiés selon un plan d'expérience où les paramètres peuvent prendre 2 ou 3 niveaux de valeurs maximum (type "Mixed 2 and 3 level designs") (30). Plus de cent simulations numériques ont ainsi été réalisées ( $N = 108$ ). Ce type de plan d'expérience permettra d'étudier les relations entre les facteurs qui vont varier et les variables étudiées. Les relations mises en avant pourront être de type linéaire ou quadratique en fonction du nombre de niveaux retenus pour les facteurs. L'influence relative des facteurs sur les grandeurs étudiées sera mise en avant par l'étude de diagrammes Pareto car ces graphiques permettent de mettre en évidence les causes les plus importantes d'un phénomène. Les effets estimés d'un facteur sur une variable seront ainsi exprimé grâce à une valeur sans unité. Une valeur positive de l'effet augmentera le phénomène alors qu'une valeur négative le diminuera. Seuls les facteurs présentant une p-valeur inférieure à 0,05 seront étudiés en détail et significatifs (c'est-à-dire ceux dont la valeur rapportée dans le diagramme est au-dessus de la ligne correspondant à  $p=0.05$ ). La cohérence des différents modèles statistiques obtenus sera déduite de la valeur du coefficient de détermination ajusté  $R^2_{adj}$ . Dans les diagrammes de Pareto présentés dans cet article, seuls les facteurs les plus influents seront représentés donc les courbes de pourcentages cumulés ne pourront être fournies.

### 3. RESULTATS

#### 3.1 Projection du piéton

La figure 3 fournit les principales influences des paramètres sur le type de projection. Ce dernier dépend principalement de l'accélération du véhicule, de la loi de contact piéton-véhicule et de la vitesse du véhicule ainsi que de leurs effets d'interaction respectifs ( $R^2_{adj} = 0,74$ ). Une projection de type "projection sur le toit" (Fig. (b)) est favorisée par une accélération positive du véhicule, une vitesse élevée et un contact de type purement élastique. Au contraire, une projection de type enroulée (Fig. (a)) est favorisée par une accélération nulle ou un freinage, une faible vitesse et un contact avec amortissement. La trajectoire de type enroulée est observée dans 76 cas sur 108 simulations. Dans des configurations intermédiaires, le piéton peut être amené à rester sur le capot du véhicule (dans neuf cas sur 108). Ainsi on peut en déduire que pour qu'un piéton passe par-dessus le toit de la voiture alors il faut que la vitesse de la voiture soit importante et qu'elle accélère. Ces informations peuvent apparaître importantes lors de la reconstruction d'un accident surtout lorsqu'un témoin déclare avoir vu le piéton passer par-dessus le véhicule.

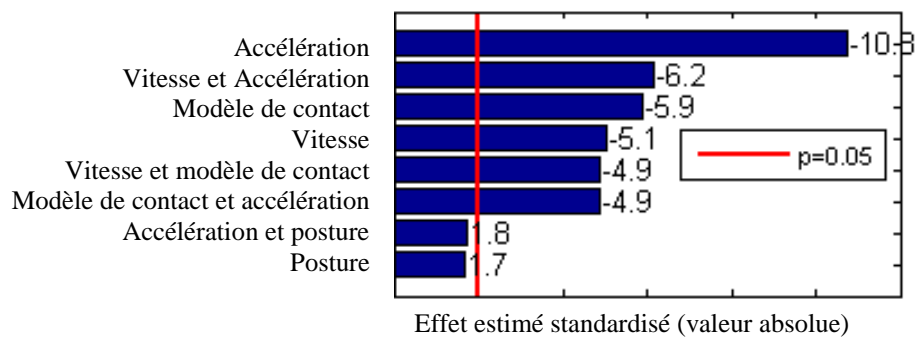


Fig. 2 – Diagramme de Pareto pour le type de projection

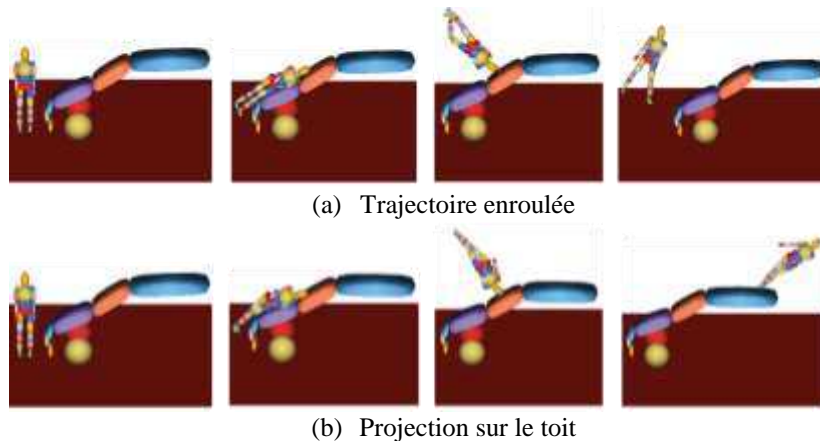
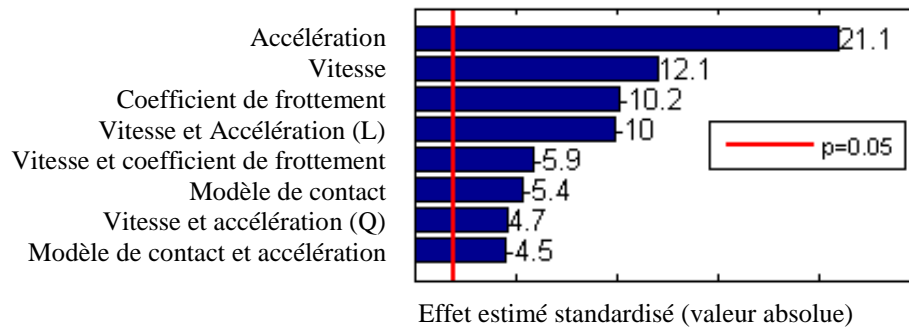


Fig. 4 – Cinématique d'une trajectoire enroulée (a) et d'une projection sur le toit (b)

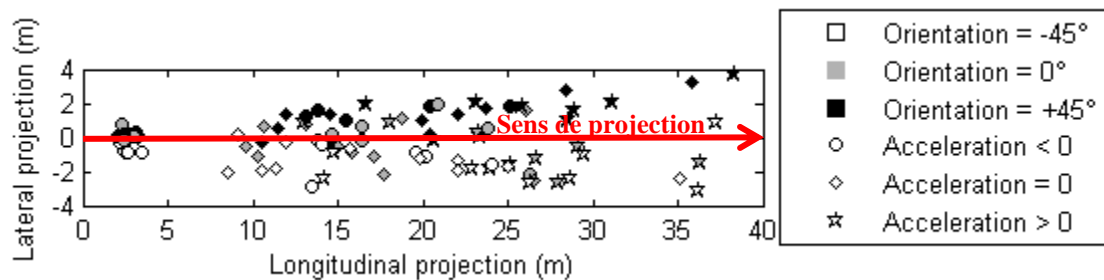
Pour les distances de projection longitudinales et latérales, on exclura les cas où le piéton reste sur le capot du véhicule. La distance de projection longitudinale dépend alors principalement de l'accélération du véhicule, de la vitesse du véhicule au moment de l'impact, du coefficient de frottement entre le piéton et le sol ainsi que de leurs effets d'interaction respectifs ( $R^2_{adj} = 0,92$ ) (cf. Fig. ). La distance de projection augmente lorsque le véhicule accélère ou lorsque la vitesse du véhicule est élevée. A l'inverse, plus le coefficient de frottement entre le piéton et le sol est élevé, plus la distance de projection est faible. Ces résultats peuvent ainsi permettre d'évaluer la vitesse du véhicule au cours du choc grâce à la distance de projection et d'estimer si le véhicule a freiner ou pas. Ainsi, pour que la projection d'un piéton soit plus importante, il faut que la vitesse de la voiture soit importante et qu'elle accélère puisqu'elle va, de cette manière, « emporté » le piéton plus loin.



**Fig. 5 – Diagramme de Pareto : projection longitudinale**

La direction de projection dépend principalement de l'orientation du piéton par rapport au véhicule et dans une moindre mesure de la position des jambes et des effets d'interaction entre ces deux facteurs ( $R^2_{adj} = 0,54$ ). Lorsque l'orientation du piéton est positive, le piéton a tendance à être projeté vers la gauche du véhicule.

La Fig. offre un aperçu des projections longitudinales et latérales en fonction de l'orientation du piéton et de l'accélération du véhicule. D'un point de vue global il apparaît des distances de projections longitudinales pouvant aller jusqu'à 40 mètres même si de nombreuses simulations, celles réalisées à faible vitesse (5,5m/s), montrent une distance de projection d'environ 3 mètres. Latéralement, le piéton n'est pas projeté à plus de 4 mètres de son point d'impact.



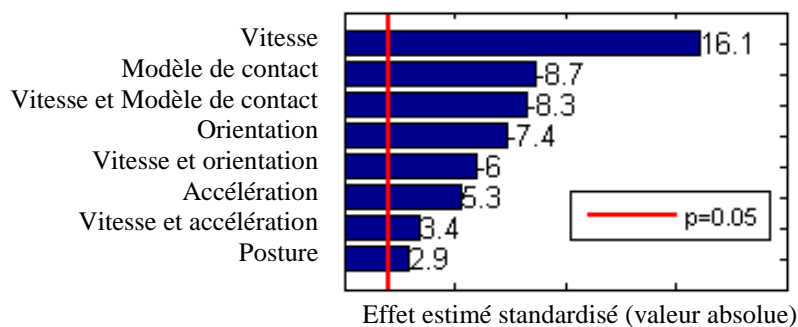
**Fig. 6 – Projection en fonction de l'orientation et de l'accélération**

(Le point de coordonnée (0,0) marque le point d'impact entre le véhicule et le piéton)

Là encore, ces résultats peuvent permettre d'estimer le sens de marche du piéton lorsqu'il a été impacté ainsi que sa posture.

### 3.2 Critères lésionnels

La valeur du HIC dépend principalement de la vitesse du véhicule au moment de l'impact (cf. Fig. ) mais aussi du modèle de contact, de l'orientation du piéton par rapport au véhicule et de leurs interactions respectives ( $R^2_{adj} = 0,89$ ). Un HIC élevé est favorisé par une vitesse élevée. La loi de contact avec amortissement favorise aussi des valeurs élevées pour le HIC.



**Fig. 7 – Diagramme de Pareto: HIC**

En ce qui concerne les membres inférieurs, il est difficile de prévoir les lésions. En effet, sur les 108 simulations, seules huit présentent des AIS différents de trois pour les jambes droite et gauche. Aucun modèle statistique n'a réellement pu être dégagé ( $R^2_{adj} = 0,13$  et  $R^2_{adj} = 0,09$  respectivement pour la jambe gauche et la jambe droite).

### 3.3 Impact tête

La valeur du WAD dépend principalement de la vitesse, de la modélisation du contact et de l'orientation ( $R^2_{adj} = 0,87$ ) (cf. Fig. ). La valeur du WAD augmente avec la vitesse du véhicule ce que l'on retrouve dans la Fig. .

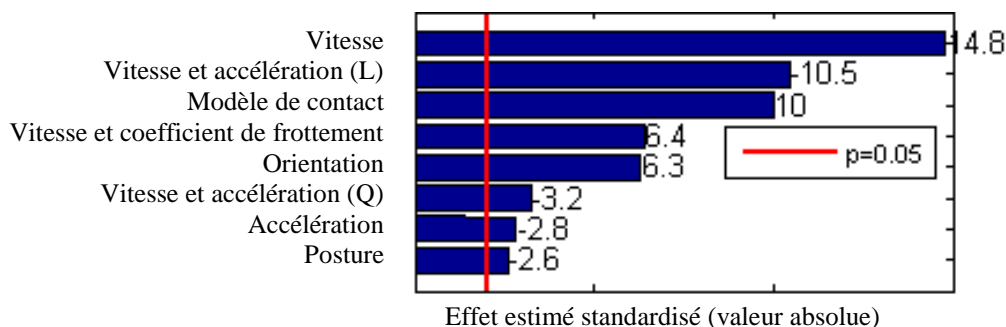


Fig. 8 – Diagramme de Pareto: WAD

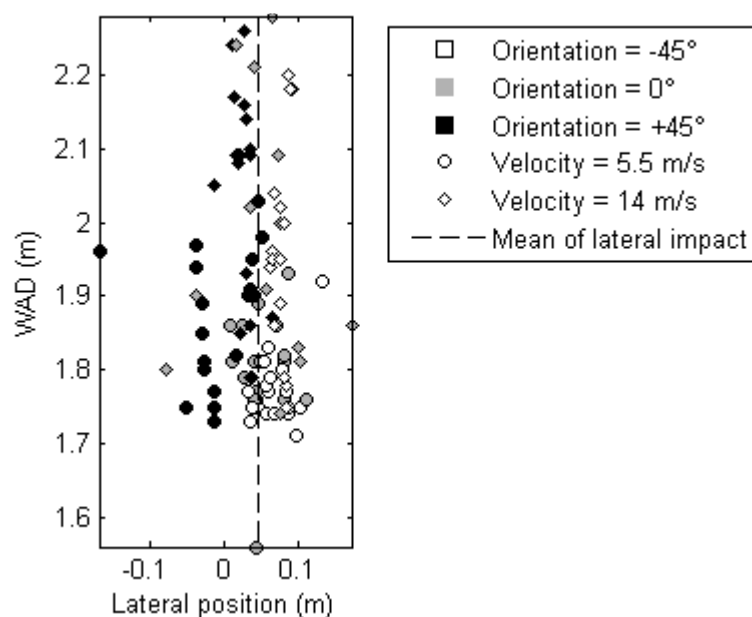


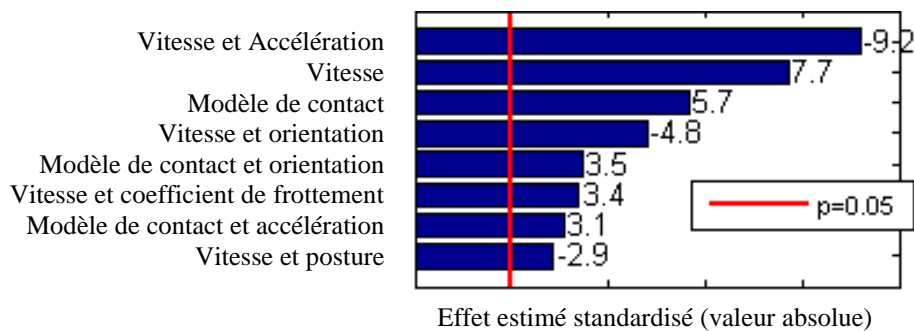
Fig. 9 – Impact tête en fonction de l'orientation et de la vitesse

L'orientation du piéton au moment de l'impact jouera alors un rôle prépondérant dans la direction de l'impact de tête. On retrouve ce résultat dans la Fig. où les positions latérales d'impact de la tête sont réparties de part et d'autre de l'impact latéral moyen en fonction de l'orientation positive ou négative du piéton au moment de l'impact. Dans le cas d'une orientation nulle du piéton par rapport au véhicule, on observe une équi-répartition autour de l'impact latéral moyen.

Pour l'angle d'impact de la tête sur le véhicule, le modèle statistique fournit une valeur de  $R^2_{adj}$  de 0,75 (Effet estimé standardisé (valeur absolue)

Fig. 3). L'interaction entre la vitesse du véhicule et l'accélération du véhicule est le facteur qui influence le plus l'angle d'impact de la tête sur le véhicule. L'angle d'impact moyen observé est de 55,4° par rapport au sol et les angles extrêmes observés sont respectivement de 20,8° pour l'angle minimal et de 83,4° pour l'angle maximal.



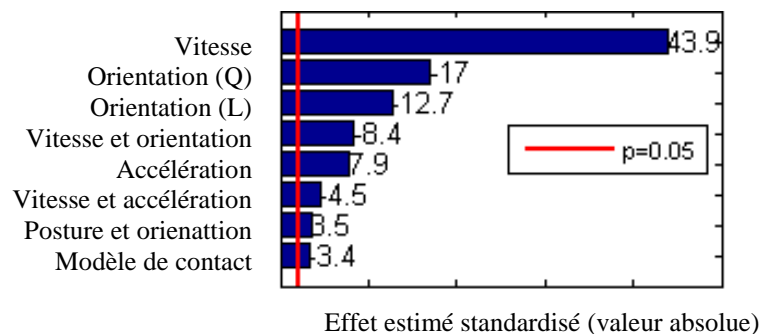


**Fig. 3 – Diagramme de Pareto: Angle d'impact de la tête**

La vitesse d'impact de la tête sur le véhicule dépend principalement de la vitesse du véhicule et de l'orientation du piéton ainsi que de l'interaction de ces deux facteurs ( $R^2_{adj} = 0,97$ ) (

Effet estimé standardisé (valeur absolue)

Fig. 4). La vitesse d'impact de la tête augmente fortement avec la vitesse du véhicule. La vitesse d'impact moyenne observée est de  $10,4 \text{ m.s}^{-1}$  et les vitesses extrêmes observées sont respectivement de  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$  pour la vitesse minimale et de  $20,9 \text{ m.s}^{-1}$  pour la vitesse maximale.



**Fig. 4 – Diagramme de Pareto: vitesse d'impact de la tête**

## 4. DISCUSSION

D'une manière générale, il apparaît que les deux facteurs les plus influents sur la cinématique du piéton sont la vitesse et l'accélération du véhicule ainsi que l'orientation du piéton par rapport au véhicule. Si la variation de vitesse a fait l'objet de nombreuses études (5-6-7-8), la variation d'accélération ou d'orientation n'avait toutefois pas fait l'objet de précédentes recherches. Notre recherche a donc permis de mettre en exergue leur rôle dans le comportement du piéton au cours du choc. Les paramètres les plus importants pour la cinématique du piéton sont décrits ci-après et des éléments de discussion sont apportés pour chacun d'entre eux.

A noter également que l'influence de la géométrie du véhicule et de la taille du piéton n'a pas été abordée ici car elle a été largement traitée dans la littérature. Ces deux paramètres influent notamment sur la manière dont le piéton va « s'envelopper » autour de la face avant du véhicule et donc de sa projection ou encore sur la hauteur d'impact des jambes et de la tête. Les nombreuses études ont ainsi permis d'évaluer de quelle manière influençait la forme de la face avant de la voiture sur les conditions d'impact de la tête.

### 4.1 Projection du piéton

Les principaux facteurs influençant de façon significative la distance de projection longitudinale sont similaires à ceux qui jouent un rôle dans le type de projection. Une accélération positive par exemple, augmente la distance de projection longitudinale car le piéton peut alors être transporté par le véhicule sur une courte distance (sur le capot ou sur le toit) alors que lorsque le véhicule freine, le piéton a tendance à être immédiatement projeté en avant du véhicule ce qui diminue la distance de projection.

L'influence observée de l'accélération et de la vitesse sur le type de projection confirme les observations de (Ravani et al., 1984). D'après (Wood et al, 2005), les trajectoires enroulées et projections sur le toit sont observées lorsque le centre de gravité du piéton est situé au-dessus de la ligne de fuite du capot ce qui est le cas dans notre étude. Les projections vers l'avant étant favorisées lorsque le centre de gravité du piéton est situé en dessous de la ligne de fuite du capot, aucune projection de ce type n'a été observée dans le cadre de cette étude. Rappelons ici que nous n'avons pas souhaité, dans cette recherche, étudier l'influence de la forme du véhicule.

La direction de projection latérale dépend principalement de l'orientation du piéton et de la position de ses jambes au moment de l'impact. Le corps du piéton va en effet effectuer une rotation autour de la première jambe impactée. Le sens de projection du piéton va donc dépendre de la position relative de ses jambes par rapport au véhicule, c'est à dire de l'orientation du piéton et de son attitude de marche.

D'un point de vue accidentologique, ces résultats permettent d'estimer des paramètres non connus lors de la reconstruction de l'accident. Ainsi, grâce à la distance de projection, il sera possible d'évaluer la vitesse du véhicule ou encore d'évaluer si le conducteur a freiné ou au contraire a accéléré lors du choc. La position finale du piéton sur un lieu d'accident permet également de renseigner sur la direction de sa projection et donc de son sens de marche. L'ensemble de ces éléments factuels pouvant ensuite être confronté aux déclarations des témoins.

## **4.2 Critères lésionnels**

Les travaux de (Liu et al, 2002) ont montré une augmentation de la valeur du HIC avec la vitesse du véhicule. L'étude paramétrique réalisée confirme les résultats de Liu et montre que la vitesse du véhicule est le principal facteur influençant le HIC. Le choix de modélisation du contact a aussi une influence significative sur la valeur du HIC. On remarquera que la valeur retenue pour le HIC peut venir de l'impact de la tête contre le véhicule ou de l'impact de la tête contre le sol. La valeur du HIC peut donc dépendre de la cinématique au moment du contact entre le piéton et le véhicule ou pendant la projection du piéton.

Pour les membres inférieurs, compte tenu du type de véhicule utilisé et de la taille du piéton, le pare-chocs impacte le piéton au niveau de la partie supérieure du tibia, ce qui peut à la fois provoquer une fracture du tibia et une importante elongation des ligaments (31). Cette combinaison de plusieurs mécanismes lésionnels engendre une valeur de MAIS élevée dans la gamme de vitesse étudiée.

Là encore, l'ensemble de ces résultats peuvent renseigner sur l'estimation d'une vitesse d'impact.

## **4.3 Impact tête**

Plusieurs études dont (32) ont montré que le WAD augmentait avec la vitesse du véhicule ce que confirme notre étude paramétrique. La dépendance du WAD vis-à-vis du coefficient de frottement peut s'expliquer par la modification de la cinématique due au phénomène de frottement entre les pieds et le sol au début de l'impact. De plus, de la même façon que pour la valeur du HIC, le choix de modélisation de contact entre le piéton et le véhicule a une influence significative sur la cinématique du piéton et donc sur la valeur du WAD.

La position latérale de l'impact de la tête dépend principalement de l'orientation du piéton par rapport au véhicule. Il faut toutefois noter que l'ordre de grandeur des valeurs mises en jeu est faible (de l'ordre du centimètre). Il faudra donc faire preuve de la plus grande prudence lors de l'exploitation de tels résultats dans le cas d'une reconstitution d'accident réel par exemple.

Les valeurs moyennes de l'angle d'impact de la tête par rapport au sol et de la vitesse relative de l'impact par rapport au véhicule sont cohérentes avec les valeurs préconisées pour les essais sous-systèmes (33). En effet, les normes proposent une vitesse d'impact d'environ  $10 \text{ m.s}^{-1}$  et un angle d'impact de  $50^\circ$  pour un impacteur de type enfant et  $35^\circ$  pour un impacteur de type adulte. La norme ISO (33) propose aussi une relation de dépendance de la vitesse d'impact de la tête par rapport à la vitesse d'impact du véhicule. Cette relation dans laquelle la vitesse d'impact de la tête augmente avec la vitesse du véhicule est cohérente avec les résultats de notre étude paramétrique.

La vitesse d'impact de la tête dépend aussi de l'orientation du piéton au moment de l'impact. Ce phénomène peut s'expliquer d'une part par la modification de la cinématique du piéton avant l'impact de tête et d'autre part, par l'impact préalable de l'épaule ou non, en fonction de l'orientation. En effet, l'intervention de l'épaule peut modifier sensiblement l'angle d'impact de la tête (34) et donc la vitesse d'impact de la tête.

## 5. CONCLUSION

De nombreuses études ont porté sur les facteurs influençant un accident entre un véhicule et un piéton (3-4-5-6-7-8), mais aucune ne s'est intéressée à l'influence conjuguée de plusieurs facteurs. Aussi, si notre recherche confirme les résultats déjà présents dans la littérature, elle permet de compléter ces résultats par la mise en valeur d'autres facteurs d'influence, et des effets conjugués de l'ensemble des facteurs étudiés.

Ainsi, les résultats obtenus peuvent permettre de faire des choix de modélisation en connaissance de cause, en fonction des attentes du modèle étudié. Par exemple, il peut apparaître important de se concentrer sur la détermination de l'accélération du véhicule dès lors que l'on souhaite travailler sur le type ou la distance de projection du piéton.

Plusieurs perspectives sont envisageables pour donner suite à ce travail. Il serait intéressant de compléter cette étude en étudiant d'autres types de véhicule et différentes tailles de piéton. Une méthodologie similaire pourrait aussi être utilisée pour étudier le cas d'un accident impliquant un cycliste ou un motocycliste. Ce travail pourrait aussi donner des éléments de base pour reconstituer des accidents réels, dans le cadre d'expertises judiciaires par exemple.

## 6. REFERENCES

- (1) J P Depriester et al. (2005) Comparison of several methods for real pedestrian accident reconstruction,' 19th Int Tech. Conf. on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Washington (USA), June 6–9 2005 Paper #05–0333.
- (2) T. Serre et al. (2006) Pedestrian and Cyclist Accidents: A Comparative Study Using In-Depth Investigation, Multibody Simulation and Experimental Test. IRCOBI Conference, 2006.
- (3) Serre, T. et al. (2007) Real accidents involving vulnerable road users: in-depth investigation, numerical simulation and experimental reconstitution with PMHS. International Journal of Crashworthiness, 12:3,227–234.
- (4) Ravani B. et al. (1981) Pedestrian Post-Impact Kinetics and Injury Patterns. SAE 811024.
- (5) Cavallero C. et al. (1983) Improvement of pedestrian safety: Influence of shape of passenger car front structures upon pedestrian kinematics and injuries: evaluation based on 50 cadaver tests, SAE No. 830624.
- (6) Longhitano D. et al. (2005) J. Influence of Vehicle Body Type on Pedestrian Injury Distribution. SAE transactions ISSN 0096-736X, vol. 114 pp. 2283-2288
- (7) Liu, X.J., et al. (2002). A Study of Influences of Vehicle Speed and Front Structure on Pedestrian Impact Responses Using Mathematical Models. Traffic Inj. Prev. 3, 31-42.
- (8) Glasson E. et al. (2000) A Numerical Analysis of the Car Front End Module Regarding Pedestrian Lower Limb Safety. Vehicle Safety, C567/016/2000, pp. 79–91.
- (9) Otte D. (1994) Influence of the Fronthood Length for the Safety of Pedestrians in Car Accidents and Demands to the Safety of Small Vehicles. SAE #942232.
- (10) L. van Rooij et al. (2003) Pedestrian crash reconstruction using multi-body modeling with geometrically detailed, validated vehicle models and advanced pedestrian injury criteria Paper 468, Proceedings of the 18th international conference on the enhanced safety of vehicles (ESV).
- (11) R. Anderson et al. (2008) Determination of boundary conditions for pedestrian collision reconstructions.
- (12) Wood, D. P. (1988) Impact and movement of pedestrian in frontal collisions with vehicles. Proc. Instn Mech. Engrs, Part D: J. Automobile Engineering, 202(D2), 101–110.
- (13) CK Simms et al. (2004) Confidence limits for impact speed estimation from pedestrian projection distance. - International Journal of Crashworthiness, Vol9 No 2 pp 219-228.

- (14) Wood DP et al. (2005) Vehicle-Pedestrian Collision: Validated Models for Pedestrian Impact and Projection[J].Proceedings of Institution Mechanical Engineer,Part D:Journal of Automobile Engineering.219:183-195.
- (15)Crandall JR. et al. (2002) Designing road vehicles for pedestrian protection. BMJ, Vol 324, pp 1145-1148.
- (16)Niederer P, Schlumpf M. (1984) Influence of vehicle front geometry on impacted pedestrian kinetics. STAPP, Vol 841663, pp 135-147.
- (17)Untaroiu et al. (2008) Crash reconstruction of pedestrian accidents using optimization techniques, International Journal of Impact Engineering, doi:10.1016/j.ijimpeng.2008.01.012.
- (18)TNO Automotive, Theory manual – Madymo V6.0, 2001.
- (19)Yang JK et al. (1993) Development and Validation of a Mathematical Breakable Leg Model, IRCOBI, p. 175-186.
- (20)Mizuno Y., (2005) Summary of IHRA Pedestrian Safety WG activities (2005) – Proposed Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Offered by Passenger Cars. Proceedings of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Washington, DC, Paper 05-0138.
- (21)J K Yang et al. (2000) A Human-Body 3D Mathematical Model for Simulation of Car-Pedestrian Impacts. Journal of Crash Prevention and Injury Control, 2(2) 131-149,.
- (22)Yang J. (1997) Mathematical simulation of knee responses associated with leg fracture in carpedestrian accidents. International Journal of Crashworthiness.
- (23)P. Schreiber et al. (1998) Static and dynamic bending strength of the leg. IJCrash 98, Vol 3 No 3. 295-308.
- (24)Wood D., Simms C. (2000) Coefficient of Friction In Pedestrian Throw. Impact – Journal of ITAI, vol 9 no 1, p12-14.
- (25)EEVC Working Group 17 (2002) Report Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars.
- (26)Versace J. (1971) A review of the severity index. Proc. of the Fifteenth Stapp Car Crash Conference, no. SAE Paper No. 710881. Society of Automotive Engineers, pp. 771–796.
- (27)SAE, (1995) Instrumentation for impact test, Part 1: Electronic instrumentation, SAE J211/1, Society of Automotive Engineers.
- (28)Association for the Advancement of Automotive Medicine. (1998) The abbreviated injury scale. AAAM.
- (29)M Stevenson et al. (2001) An overview of the injury severity score and the new injury severity score. Inj Prev 7, pp. 10–13.
- (30) Hill, T., Lewicki, P. (2007) STATISTICS Methods and Applications. StatSoft, Tulsa.
- (31)Arnoux PJ. et al. (2006) Lower limb injury criteria in real pedestrian impact situation, IRCOBI.
- (32)JARI, NHTSA, RARU. (2002) Computer Simulation Analysis for Pedestrian Head Impact Condition. 11th IHRA/PS 215, June.
- (33)ISO: Passenger cars and light commercial vehicles - Pedestrian protection - Impact test method for pedestrian head. ISO/TC22/SC10/WG2 doc. N553, working draft #4.
- (34)T Serre et al. (2007) ‘Variation of the head impact angle during a pedestrian accident: numerical and experimental approach’, Journal of Biomechanics, 40(Supp 2) S88.

- (35) K. Mizuno, J. Kajzer. (2000) Head Injuries in Vehicle-pedestrian impact. SAE Technical Paper, SAE 2000 World Congress, Detroit, Michigan, paper 2000-01-0157